Environnement Canada Environnement Canada

DIVISION DE RECHERCHE SUR L'ADAPTATION ET LES RÉPERCUSSIONS (DRAR)
Environnement Canada

LES OPTIONS D'ADAPTATION DES INFRASTRUCTURES À L'ÉVOLUTION DU CLIMAT

Par :
Heather Auld, Don MacIver, Joan Klaassen

PAPIER OCCASIONNEL 10

2007

LES OPTIONS D'ADAPTATION DES INFRASTRUCTURES À L'ÉVOLUTION DU CLIMAT

Heather Auld[1], Don MacIver[1], Joan Klaassen[2]

1 Division de la recherche sur l'adaptation et les répercussions Environnement Canada 4905, rue Dufferin Toronto (Ontario) M3H 5T4

2 Division des sciences atmosphériques et de l'application Environnement Canada – Région de l'Ontario 4905, rue Dufferin Toronto (Ontario) M3H 5T4

RÉSUMÉ

catastrophes liées aux phénomènes météorologiques, intensifier dans certaines régions l'altération climatique prématurée des infrastructures et entraîner d'importantes modifications dans les critères de conception et l'ingénierie des ouvrages. Puisque les éléments d'infrastructure construits à notre époque sont conçus pour durer plusieurs décennies, il est d'une importance capitale que l'on élabore dès maintenant des options d'adaptation aux changements climatiques, qu'on les intègre dans la conception et qu'on les mette en œuvre le plus tôt possible.

Pour déterminer les priorités parmi les mesures d'adaptation requises, il faudra prendre en compte les vulnérabilités actuelles et futures, le cycle de vie différent des ouvrages selon leur nature, ainsi que les cycles de remplacement et d'entretien. Des mesures d'adaptation de type « sans regret » qui existent déjà aujourd'hui devront être appliquées le plus rapidement possible. Cela comprend des mesures qui viseront à réduire les incertitudes dans les valeurs de calcul climatiques, à mettre ces valeurs régulièrement à jour, à mettre en application les codes et les normes, à assurer la continuité des relevés et des réseaux de données climatiques, à effectuer des analyses diagnostiques cohérentes des défaillances des infrastructures, à établir des calendriers d'entretien régulier et à planifier la gestion des catastrophes à l'échelon des collectivités. Cependant, étant donné l'ampleur des changements prévus, il est probable que bon nombre des répercussions sur les collectivités et les infrastructures se situeront hors des plages d'adaptation possibles des infrastructures. Lorsque cela se produira, il faudra que les ingénieurs et les planificateurs tiennent compte dans leurs pratiques de ces incertitudes croissantes, jusqu'à ce que de nouvelles options d'adaptation puissent être élaborées au fil du temps.

Mots clés : infrastructures, codes et normes, changements climatiques, adaptation

1. INTRODUCTION

Avec l'évolution du climat, les risques de défaillance des infrastructures augmenteront probablement dans le monde entier, par suite de la modification des régimes météorologiques, de la variabilité accrue des phénomènes météorologiques extrêmes et de la plus forte intensité de ces phénomènes extrêmes dans certaines régions. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2001), des changements régionaux dans les phénomènes extrêmes pourraient avoir des effets sur l'ampleur des inondations ou des sécheresses, ainsi que sur la fréquence et la gravité des systèmes cycloniques (y compris les ouragans). À l'échelle locale, des facteurs tels que la modification de la configuration des vents ou de la trajectoire des tempêtes pourraient partiellement neutraliser ces effets. En tout état de cause, l'évolution du

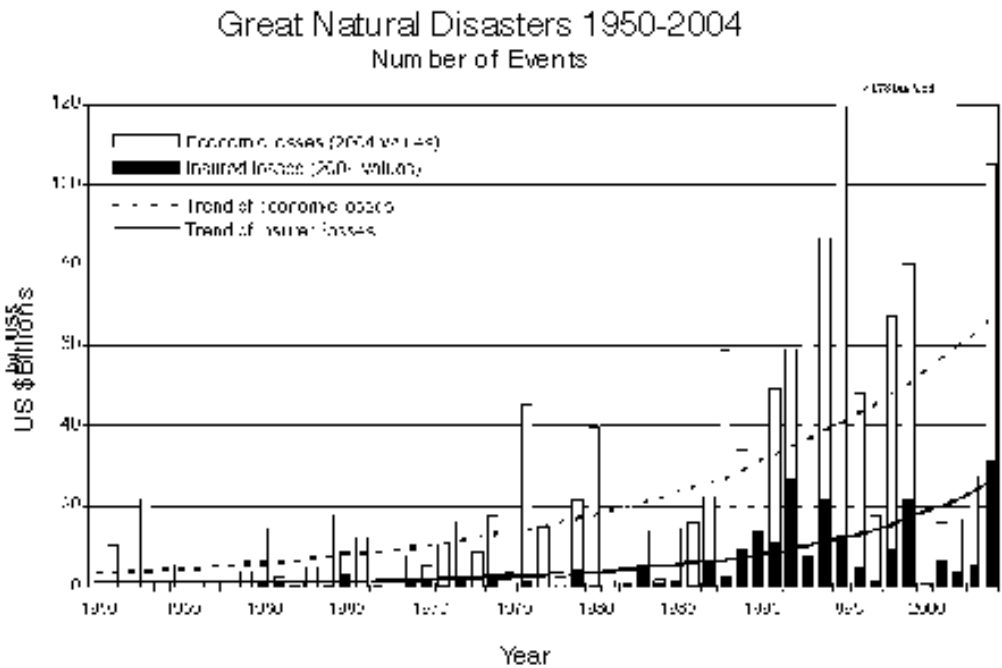

FIGURE 1. (Tiré de GIEC, 2001, et Munich Re, 2000, avec mise à jour selon les données de Munich Re, 2005.) Les catastrophes naturelles sont dites grandes lorsqu'elles dépassent les capacités d'une région d'y faire face par elle-même, comme c'est habituellement le cas lorsque des milliers de personnes périssent, des centaines de milliers d'autres sont laissées sans abri ou qu'un pays subit des pertes économiques importantes. Les pertes économiques annuelles occasionnées par ces grandes catastrophes se sont accrues par un facteur de 10,3, passant de 3,9 milliards dans les années 1950 à 40 milliards de dollars américains par année dans les années 1990 (exprimés en $US de 1999). Les coûts s'élèvent au double de ces montants si l'on inclut les pertes imputables aux phénomènes météorologiques relativement ordinaires (GIEC, 2001). La population n'a augmenté que par un facteur de 2,4 durant cette période.

climat nous obligera à modifier les critères de conception des infrastructures, en plus de nécessiter des changements sociétaux et sectoriels de plus grande ampleur. Dans son Troisième Rapport d'évaluation, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2001) affirme :

> *« Les caractéristiques clés des changements climatiques, sous l'angle de la vulnérabilité et de l'adaptabilité, sont liées à la variabilité et aux phénomènes extrêmes et non pas uniquement aux changements dans les conditions moyennes. La plupart des secteurs et des régions peuvent raisonnablement s'adapter aux variations des conditions moyennes, particulièrement si ces variations sont graduelles. Toutefois, les collectivités sont plus vulnérables et peuvent moins facilement s'adapter aux changements de fréquence ou d'ampleur des conditions autres que moyennes, en particulier aux phénomènes extrêmes. » (Chapitre 18, page 879.)*

Les phénomènes météorologiques extrêmes sont très dommageables pour les infrastructures, comme en témoignent les statistiques mondiales sur les dommages et les pertes imputables aux intempéries. La figure 1 illustre cette tendance dans les pertes mondiales occasionnées par les catastrophes entre 1950 et 2004 (Munich Re, 2000; Munich Re, 2005). Au cours de la décennie 1990, les pertes annuelles directes causées par les grandes catastrophes naturelles, ou les catastrophes importantes à l'échelle mondiale, avaient plus que décuplé par rapport à la décennie 1950, passant de 3,9 milliards à 40 milliards de dollars américains par année (en dollars de 1999), même si la population n'avait augmenté entre-temps que par un facteur de 2,4. En réalité, les coûts s'élèvent au double de ces montants si l'on inclut les pertes imputables aux phénomènes météorologiques relativement ordinaires. L'augmentation des pertes est en majeure partie attribuable aux phénomènes météorologiques à fort impact. Parmi les autres facteurs qui influent sur les pertes ainsi que sur la vulnérabilité des collectivités et des infrastructures face aux phénomènes extrêmes, on compte l'accroissement de la richesse, le plus grand nombre de biens assurés, la croissance démographique, la mise en valeur de zones à risque élevé comme les régions côtières ou les plaines d'inondation, le vieillissement des infrastructures et la dépendance croissante à l'égard de services ininterrompus (p. ex., électricité, communications). Sur des pertes totales s'élevant en moyenne à 40 milliards de dollars par année, environ 9,6 milliards de dollars de dommages directs résultent de la perte d'infrastructures (Freeman et Warner, 2001). Dans le cas des inondations, selon certaines estimations, la défaillance des infrastructures et les pertes qui s'y rattachent ont été à l'origine de 65 % de toutes les pertes (Swiss Re, 1997). D'après des études menées par l'Institut de recherches en bâtiment de la Norvège (Liso et coll., 2003), le coût de la réparation des dommages causés aux infrastructures par les tempêtes dans ce pays est estimé à environ 5 % du coût des investissements annuels dans les nouvelles constructions, soit approximativement 0,6 milliard de dollars américains (4 milliards de couronnes norvégiennes) par année. Même si l'augmentation du nombre et de l'intensité des tempêtes à l'échelle régionale peut jouer un rôle dans ces catastrophes, il n'y a aucun doute qu'une part considérable de la hausse des coûts résulte aussi de la vulnérabilité croissante des collectivités et des infrastructures aux phénomènes météorologiques extrêmes, pour les raisons mentionnées plus haut (Pielke et Downton, 2000; Auld et MacIver, 2004).

LES MESURES D'ADAPTATION « SANS REGRET »

Comme l'illustre le tableau 1, les nouveaux projets d'infrastructure sont conçus pour durer plusieurs décennies. Il est essentiel pour la longévité de ces ouvrages que l'on élabore et l'on applique le plus rapidement possible des options d'adaptation afin qu'ils puissent résister aux changements climatiques

prévus. Certaines options peuvent être décrites comme étant des mesures « sans regret », c'est-à-dire des mesures dont la société bénéficierait même en l'absence de changements climatiques d'origine anthropique (GIEC, 2001). Parmi les mesures de ce type, on compte celles qui visent à réduire et à rendre inopérantes les incertitudes dans les valeurs de calcul climatiques, à mettre ces valeurs à jour, à mettre en application les codes et normes de génie civil, à assurer la qualité et la continuité des relevés et réseaux de surveillance de l'évolution du climat, à effectuer des analyses diagnostiques cohérentes des défaillances des infrastructures, à assurer l'entretien régulier des ouvrages existants et à planifier la gestion des catastrophes à l'échelon des

TABLEAU 1. Durée du cycle de vie des infrastructures (adapté de Planning Institute of Australia, 2004)

Ouvrage	Phase	Cycle de vie typique prévu
Bâtiments commerciaux	Modernisation Démolition	20 ans 50-100 ans
Habitations	Ajouts et modifications	15-20 ans
	Démolition	60-100 ans
Routes	Entretien	Tous les ans
	Réfection des revêtements	5-10 ans
	Reconstruction/ réfections majeures	20-30 ans
Ponts	Entretien	Tous les ans
	Réfection des revêtements de béton	20-25 ans
	Rénovations importantes	60-100 ans
Chemins de fer	Rénovations importantes	10-20 ans
	Reconstruction/ réfections majeures	50-100 ans
Aéroports	Rénovations importantes	10-20 ans
	Reconstruction/ réfections majeures	50 ans
Ports de mer	Rénovations importantes	10-20 ans
	Reconstruction/ réfections majeures	50-100 ans
Barrages/ alimentation en eau	Rénovations importantes Reconstruction/ réfections majeures	20-30 ans 50 ans
Gestion des déchets	Rénovations	5-10 ans
	Réfections majeures	20-30 ans
Égouts	Reconstruction/ réfections majeures	50 ans

collectivités. Dans d'autres cas, les répercussions du climat futur se situeront hors du champ de l'expérience acquise et des plages d'adaptation possibles des infrastructures. Dans ces situations, il faudra élaborer des options d'adaptation ou tirer des leçons, avec le temps, sur les mesures à prendre en effectuant des analyses structurées ou diagnostiques des défaillances (apprentissage de l'adaptation). Parallèlement à cela, il faudra que l'adoption d'approches « tous risques » plus rigoureuses se répande dans le domaine de la planification de la gestion des opérations en cas de catastrophe.

Entre les mesures « sans regret » et les mesures d'« apprentissage de l'adaptation », on trouve les activités qui visent à étoffer les connaissances scientifiques sur l'adaptation et à accroître les capacités d'action futures. Cette hiérarchie des mesures d'adaptation indique la succession de mesures qu'il faudra prendre : 1) pour répondre aux besoins d'adaptation « sans regret » à court terme (p. ex., mettre à jour les valeurs de calcul climatiques afin de prendre en compte les conditions climatiques les plus récentes); 2) pour étoffer les connaissances scientifiques sur l'adaptation, élaborer des solutions et réduire les incertitudes, de manière à permettre une action au cours des 10 à 20 prochaines années (p. ex., incorporer des scénarios dans les valeurs de calcul climatiques); 3) pour progresser dans l'élaboration des solutions qui seront requises à plus long terme (p. ex., réinstallation des collectivités, modernisation des ouvrages). À la base de cette séquence de mesures se trouve la nécessité d'évaluer de façon continue les risques existants et l'évolution des risques, les tendances climatiques, la science des changements climatiques et les technologies disponibles, et d'assurer la souplesse qui permettra de modifier les orientations et les stratégies en fonction des nouvelles informations recueillies.

Certaines des options d'adaptation des infrastructures et de l'environnement bâti peuvent être catégorisées de la façon suivante :

1. Mesures **« sans regret »** :

- Mettre à jour et réviser régulièrement les codes et normes applicables aux infrastructures, les valeurs de calcul climatiques et les pratiques d'ingénierie adoptées pour les nouveaux ouvrages.
- Réduire les incertitudes et combler les lacunes dans les méthodes d'analyse scientifique et d'analyse des données servant à établir les valeurs de calcul climatiques pour les nouveaux ouvrages.
- S'assurer que les réseaux de surveillance du climat ont une densité suffisante, que les données recueillies sont de qualité et que les périodes de relevé ont une durée appropriée.
- Veiller au respect des codes et normes applicables aux nouveaux ouvrages.
- Évaluer régulièrement les risques occasionnés aux ouvrages existants en analysant les tendances des changements climatiques afin de déterminer les priorités concernant les régions, les variables climatiques et les types d'ouvrages qui nécessitent des mesures immédiates (p. ex., les ouvrages sensibles au dégel du pergélisol et à l'accumulation de glace).
- Réduire les taux de détérioration prématurée des ouvrages existants et nouveaux (p. ex., réduire l'infiltration d'humidité, améliorer l'entretien pour lutter contre l'altération climatique).
- Émettre des alertes météorologiques précises et à point nommé concernant les conditions dangereuses (sous la forme appropriée, aux personnes appropriées).

- Encourager l'efficacité et l'autosuffisance énergétiques.
- Soutenir les analyses diagnostiques multidisciplinaires (apprentissage de l'adaptation) et l'apprentissage en matière de réduction des risques.
- Encourager (ou réglementer) la planification, à l'échelon des collectivités, de la gestion des opérations antérieures et postérieures aux catastrophes.
- Accroître la sensibilisation aux risques auxquels les collectivités sont exposées et aux vulnérabilités de celles-ci.
- Inclure les thèmes de la construction résistante aux catastrophes et de l'adaptation aux changements climatiques dans les programmes de formation et de perfectionnement des ingénieurs et des planificateurs.

2. Mesures d'adaptation **à court et à moyen terme :**

- Modifier les coefficients de sécurité dans les codes et normes (ou les autres mesures) de manière à refléter les incertitudes croissantes et la variabilité ou les plages accrues des phénomènes extrêmes, ainsi que les risques plus élevés auxquels les nouveaux ouvrages sont exposés en raison de l'évolution du climat. Envisager d'élaborer et d'intégrer des « facteurs d'adaptation aux changements climatiques » pour permettre une mise à jour plus rapide et plus généralisée des valeurs de calcul climatiques.
- Élaborer des méthodes permettant d'intégrer des scénarios d'évolution du climat et des scénarios socio-économiques dans les valeurs de calcul climatiques et dans les pratiques d'ingénierie appliquées aux nouveaux ouvrages.
- Accroître la sécurité et la résistance des nouveaux ouvrages dans les régions et pour les types d'infrastructures à risque élevé.
- Examiner les pratiques d'ingénierie actuelles à la lumière des changements climatiques.
- Déterminer les priorités et élaborer des solutions d'adaptation, telles que des technologies de modernisation, pour les régions et les ouvrages existants les plus à risque.
- Envisager d'élaborer des normes régissant les pratiques d'entretien en vue d'accroître la fiabilité des ouvrages au fil du temps.
- Intégrer l'adaptation dans le cycle de planification, d'entretien et de remplacement des ouvrages existants.

3. Mesures d'adaptation **à long terme :**

- Dans les cas où c'est réalisable, moderniser les ouvrages à risque en fonction de valeurs de calcul reflétant les conditions climatiques prévues.
- Éviter ou réglementer les activités d'aménagement dans les zones vulnérables.
- Réinstaller ailleurs les infrastructures les plus à risque et, dans les cas où c'est nécessaire, les collectivités exposées aux plus grands risques.
- Démolir et remplacer les ouvrages peu sûrs ou abandonner les zones à risque élevé.

L'élimination des lacunes dans les données de calcul climatiques

Au Canada, et probablement ailleurs dans le monde, des lacunes qui existent de longue date dans la détermination des valeurs de calcul climatiques empêchent de prendre des décisions optimales concernant la fiabilité et la sécurité des infrastructures. Les ouvrages conçus à partir de valeurs de calcul climatiques basées sur des données de mauvaise qualité, des données trop rares, ou des relevés antérieurs effectués sur de trop brèves périodes, sont particulièrement vulnérables. Il importe de veiller en priorité à éliminer ces incertitudes et à combler ces lacunes dans les valeurs de calcul afin de pouvoir assurer une adaptation appropriée à la variabilité actuelle et prévue du climat. Nous devons mieux comprendre ces incertitudes pour être à même de déterminer si et dans quelle mesure les ouvrages peuvent tolérer de légères augmentations des charges. Par exemple, les valeurs de calcul utilisées dans les codes du bâtiment et les normes qui régissent les infrastructures varient considérablement d'une localité et d'une région à l'autre, en fonction de leur date d'établissement et du fait qu'elles ont ou n'ont pas été régulièrement mises à jour. Les incertitudes dans les valeurs de calcul climatiques dépendront fortement des facteurs suivants : la complexité du climat dans une localité donnée; la densité du réseau de stations climatologiques; la qualité des données climatologiques et la longueur des périodes de relevé servant à estimer les valeurs de calcul; la fréquence des phénomènes climatiques extrêmes; les approches statistiques adoptées et les méthodes d'interpolation spatiale et temporelle appliquées aux estimations en un emplacement donné (Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies, 1995). Dans un proche avenir, il sera encore plus important que la longueur des périodes de relevé et la qualité des données des stations climatologiques soient maintenues ou améliorées pour permettre l'interpolation adéquate des valeurs de calcul climatiques, et que les réseaux de surveillance du climat soient améliorés ou maintenus dans les zones densément peuplées, à proximité des ouvrages à risque et dans les régions les plus vulnérables aux changements climatiques.

Nous devons comprendre et réduire les effets des incertitudes dans l'estimation des valeurs de calcul climatiques historiques afin de pouvoir optimiser la sécurité et le caractère économique des ouvrages, et mettre à jour les valeurs de calcul climatiques futures. Par exemple, des hypothèses prudentes appliquées antérieurement dans certaines régions peuvent avoir donné lieu à des marges de sécurité additionnelles ou à une surconception dans les valeurs de calcul climatiques actuelles. Dans d'autres cas, à cause de lacunes dans les données climatiques qui n'ont pas été prises en compte dans le traitement des données, ou à cause de tendances régionales à la hausse des charges climatiques, il est possible que certaines valeurs de calcul climatiques actuelles occasionnent déjà des risques dans les conditions présentes et ne puissent tolérer aucune autre augmentation de charge. À titre d'exemple, des augmentations de la charge d'accumulation de glace, ou encore des changements dans les zones de pergélisol continu des régions septentrionales ou dans les zones « sujettes aux tornades » nous obligeront à modifier les codes et pratiques d'ingénierie à l'échelle régionale.

En plus de prendre des mesures pour réduire au minimum les incertitudes dans les valeurs de calcul climatiques actuelles, il importera de mettre ces valeurs à jour régulièrement au fil du temps et de les intégrer dans les codes et les normes. Dans les circonstances actuelles, la modification des codes du bâtiment et des autres normes relatives aux infrastructures se fait généralement lentement, d'autant plus que les parties prenantes de l'industrie résistent souvent à des changements qui accroissent le coût des ouvrages. Puisque les ouvrages nouveaux ou remplacés en viendront à jouer un rôle de plus en plus important dans la capacité

d'adaptation des infrastructures, particulièrement en comparaison du coût de la modernisation des infrastructures existantes, il est important de s'assurer que les ouvrages seront le plus rapidement possible adaptés de façon optimale aux conditions climatiques actuelles et futures.

L'introduction d'un « facteur d'adaptation aux changements climatiques » est une option initiale qui faciliterait les premières mesures d'adaptation et qui viendrait compléter par la suite les mesures de plus grande ampleur qui devront être incorporées dans les codes et les normes. Ce facteur est un coefficient d'adaptation que l'on pourrait appliquer aux valeurs de calcul climatiques actuelles pour refléter les changements récemment observés et les changements futurs prévus dans les conditions climatiques. Le premier terme du facteur, ($A_{actuelle}$), permet de mettre explicitement à jour les valeurs de calcul en tenant compte des observations climatiques les plus récentes et en apportant les rajustements nécessaires aux valeurs de calcul. Le second terme, ($A_{changements\ climatiques}$), vise à incorporer les augmentations prévues et les incertitudes croissantes associées aux changements climatiques attendus dans les valeurs de calcul actuelles. Le second terme joue un rôle semblable aux rajustements proposés par l'Association of British Insurers (2003). Selon les besoins, on pourrait appliquer un seul des deux termes, ou les deux termes à la fois.

Les valeurs de calcul climatiques intégrées dans les codes et les normes devront refléter l'évolution des régimes climatiques et il faudra les évaluer régulièrement en fonction des tendances climatiques régionales afin de déterminer si les marges de sécurité existantes pour les ouvrages conservent une tolérance qui leur permettra de supporter des augmentations de charge. Les localités et les régions où les tendances climatiques approchent des limites de tolérance devront accroître en priorité les valeurs de calcul applicables aux nouveaux ouvrages et, éventuellement, pourraient devoir renforcer les ouvrages existants désignés comme exposés à des risques par suite de la variabilité climatique actuelle et de l'évolution future du climat. Par exemple, on pourrait appliquer des facteurs d'adaptation aux changements climatiques propres à une région donnée si l'évaluation en fonction des tendances climatiques indique qu'il faut mettre à jour et rehausser les valeurs de calcul climatiques, ou s'il est probable que les risques occasionnés à des ouvrages en particulier s'accroîtront au fil du temps. Bien que cette approche ait l'avantage de fournir un moyen relativement simple de mettre les valeurs de calcul climatiques régulièrement à jour à mesure que les nouvelles données climatiques et les nouveaux renseignements sur les scénarios d'évolution du climat deviennent disponibles, elle pourrait avoir l'inconvénient d'être initialement difficile à comprendre pour les utilisateurs et le personnel d'inspection, et risquer ainsi d'être rejetée si elle n'était pas appuyée par des lois ou d'autres mesures contraignantes.

Il faut élaborer des méthodes qui permettront d'intégrer les renseignements sur les scénarios d'évolution du climat dans la conception des ouvrages. Les études et méthodes de ce genre sont rares. Une étude du Service météorologique du Canada, par exemple, sur la modification éventuelle des risques de forte tempête de verglas a montré que l'on devait toujours prendre en considération plusieurs analyses complémentaires lorsqu'on fait des projections sur les incidences de phénomènes extrêmes dans des conditions de changement climatique. Cette étude (Klaassen et coll., 2003), qui délimitait des régions susceptibles de faire face à des risques accrus de tempête de pluie verglaçante aux premiers stades du réchauffement hivernal, a indiqué que les méthodes statistiques de typage à l'aide de cartes synoptiques offraient de vastes perspectives pour la détermination des tendances des régimes météorologiques propices aux fortes tempêtes de verglas, sur une vaste échelle (synoptique) aussi bien qu'à l'échelle régionale et locale. Les méthodes

statistiques de typage à l'aide de cartes et les autres méthodes de réduction d'échelle des changements climatiques pour la caractérisation des phénomènes extrêmes offrent des possibilités considérables pour ce qui est de faire des projections à partir des modèles climatiques mondiaux et régionaux en ayant recours à des domaines traités de façon plus fiable par les modèles mondiaux. Parmi les autres analyses complémentaires utilisées dans le cadre de l'étude (Klaassen et coll., 2003), on compte le suivi de la trajectoire des tempêtes, l'évaluation à l'échelle synoptique de seuils pour les composantes des plus fortes tempêtes de verglas qui ont touché l'est de l'Amérique du Nord, l'évaluation de seuils pour les répercussions climatiques et l'application d'approches spatiales ou analogiques pour mettre en corrélation les conditions et les répercussions dans des régions adjacentes durant les tempêtes les plus fortes (Klassen et coll., 2003).

Il arrive souvent que les défaillances des ouvrages existants résultent d'un manque de conformité aux codes et aux normes. Par conséquent, la conformité et le renforcement de la capacité des institutions à mettre en application les normes du bâtiment et les codes de pratique deviendront de plus en plus importants à l'avenir. Plusieurs études ont montré que des dommages de vaste ampleur étaient attribuables au fait que l'industrie de la construction ne respectait pas les normes et que les inspections des bâtiments ne permettaient pas de déceler les violations. Par exemple, l'ouragan qui a frappé le nord-ouest de la Norvège en 1992 a causé des dommages aux bâtiments de l'ordre de 0,2 milliard de dollars américains (1,3 milliard de couronnes norvégiennes), et des dommages totaux aux infrastructures s'élevant à environ 0,3 milliard de dollars américains (Liso et coll., 2003). La plupart des dommages occasionnés aux bâtiments avaient été subis par les toits et les matériaux de couverture et ils auraient pu être évités si la réglementation et les codes de pratique en vigueur dans le secteur du bâtiment avaient été respectés (Liso et coll., 2003). Au Royaume-Uni, l'analyse des réclamations en fonction des données météorologiques a montré qu'un pourcentage élevé des dommages imputables au vent survenait à des vitesses de vent plus basses que les valeurs nominales de construction des bâtiments, et qu'il était attribué au non-respect des codes de pratique en vigueur (Buller, 1993).

Puisque les coefficients de sécurité varient d'un type d'ouvrage à l'autre, il est théoriquement possible que certains ouvrages conçus en fonction de conditions extrêmes à longue période de récurrence, comme les hôpitaux, puissent résister à des phénomènes météorologiques plus extrêmes à intervalle de récurrence plus long, tandis que d'autres ouvrages ayant un faible coefficient de sécurité, comme les lignes de transport d'électricité, pourraient déjà approcher la limite de leur tolérance de charge. Dans les cas où les coefficients de sécurité actuels sont relativement élevés ou prudents, il peut ne pas être nécessaire de prendre immédiatement des mesures d'adaptation pour assurer la sécurité des ouvrages. Dans d'autres cas, il se pourrait que l'on doive appliquer un facteur d'adaptation aux changements climatiques pour assurer l'adaptation dans des délais opportuns. Il faudra mener des études additionnelles pour déterminer si et quand les ouvrages seront exposés à des risques par suite de l'incertitude croissante des valeurs de calcul climatiques, et pour évaluer les effets de la modification des pratiques d'ingénierie, ainsi que des codes et des normes, sur l'aptitude des ouvrages à résister à des charges climatiques extrêmes imprévues. En ce qui a trait à la détermination des priorités parmi les mesures d'adaptation requises, il faudra mener des études pour déceler les types d'ouvrages qui sont les plus vulnérables à l'évolution du climat (p. ex., lignes de transport d'électricité, éoliennes). De telles études nous aideront aussi à déterminer dans quelle mesure les tendances actuelles à l'aménagement d'ouvrages normalisés et économiques pourraient avoir compromis la solidité ou

l'adaptabilité de ces ouvrages. Par ailleurs, une étude des typologies de base des bâtiments qui ont survécu pendant des siècles pourrait révéler des caractéristiques qui rendent ces constructions particulièrement adaptables aux variations et aux changements climatiques (Steemers, 2003). Les leçons tirées d'un tel examen permettraient de mettre en lumière des caractéristiques d'adaptabilité et de bonnes pratiques de construction qui, historiquement, pourraient avoir été le mieux adaptées aux conditions climatiques locales, et de mettre aussi en évidence les pratiques actuelles qui vont à l'encontre de l'adaptation.

Enfin, la relation entre les processus d'altération climatique, les matériaux de construction, les calendriers d'entretien et les ouvrages est complexe et doit faire l'objet d'études plus poussées (Auld et coll., 2006). Il est de plus en plus important, dans le contexte de la conception et de la construction des infrastructures, de comprendre quelles sont les meilleures façons de réduire économiquement la dégradation et les dommages. Dans bien des régions, à l'avenir, les matériaux de construction, les ouvrages et les enveloppes de bâtiment devront résister à des répercussions climatiques plus importantes que celles d'aujourd'hui. Lorsqu'on concevra les enveloppes de bâtiment afin qu'elles puissent résister à l'action du vent, il faudra recourir à des matériaux et appliquer des pratiques d'ingénierie qui assureront l'intégrité des enveloppes de telle sorte que l'humidité ne pénètre pas dans les constructions (Holm, 2003). La détermination des processus d'altération climatique les plus importants, en vue d'élaborer des mesures d'adaptation appropriées, représentera un défi particulier. Par exemple, la durée des épisodes de précipitations excessives pourrait s'avérer plus importante pour certains types de façades de bâtiment, tandis que l'intensité de la pluie battante pourrait être l'élément le plus important pour d'autres types de murs extérieurs. Sous les climats hivernaux, les cycles de gel et de dégel pourraient avoir d'importants effets sur les constructions en maçonnerie et en béton, tandis que les matériaux polymériques pourraient être davantage touchés par la somme du rayonnement ultraviolet (Holm, 2003). Les mesures d'adaptation pourraient adopter les formes suivantes : des changements dans la composition des matériaux (p. ex., béton, briques d'argile) ou l'adoption de pratiques d'ingénierie différentes afin d'assurer une plus grande durabilité, et l'intégration d'exigences relatives à l'entretien préventif dans les normes.

L'amélioration de la gestion des catastrophes à l'échelon des collectivités

On se préoccupe de plus des répercussions des dangers liés aux intempéries sur les populations vulnérables, en raison de facteurs de risque accrus tels que la croissance démographique et l'urbanisation, la proportion croissante de pauvres qui habitent dans des zones vulnérables et l'évolution du climat. Il faudra agir pour réduire l'exposition à ces dangers et améliorer la gestion des catastrophes; les mesures d'adaptation requises comprendront notamment les suivantes : des interventions planifiées consécutives à des alertes météorologiques précises et diffusées en temps opportun; une planification appropriée de l'utilisation des terres; une bonne conception et de bonnes pratiques d'ingénierie; un entretien adéquat des structures; l'efficacité et l'autosuffisance dans l'utilisation de l'énergie et des services (Freeman et coll., 2002; Planning Institute of Australia, 2004).

La réalisation d'une évaluation de la vulnérabilité ou d'une Identification du danger et évaluation des risques (IDER) est un élément extrêmement important d'une stratégie de gestion des catastrophes. La Loi sur la gestion des situations d'urgence de l'Ontario (Gouvernement de l'Ontario, 2003), par exemple, oblige toutes les administrations municipales et régionales de la province à déterminer et à évaluer divers dangers et risques

pour la sécurité publique et pour les infrastructures qui pourraient donner lieu à des situations d'urgence. La Loi prescrit qu'une IDER doit être réalisée et que les risques pour les collectivités doivent être classés par ordre de priorité. Le processus IDER conduit à l'établissement d'une liste des dangers prioritaires, ainsi qu'à la détermination des groupes et ouvrages vulnérables, des risques probables et des interventions possibles (Auld et coll., 2006). La Loi exige que les municipalités élaborent des plans exhaustifs de gestion des situations d'urgence comprenant les éléments suivants : un centre des opérations d'urgence; des interventions planifiées dans le cas des risques définis comme étant élevés; des itinéraires de transport des marchandises dangereuses; des plans d'évacuation des collectivités; des plans de rétablissement à la suite de situations d'urgence; des directives sur la planification de l'utilisation des terres en fonction des risques; des programmes de sensibilisation du public; un système de gestion des incidents; enfin, un processus d'évaluation externe (Gouvernement de l'Ontario, 2003). À l'appui du processus IDER, le Service météorologique du Canada et Gestion des urgences Ontario ont créé un site Web (www.hazards.ca) et élaboré une publication sur les dangers atmosphériques qui permettent aux gestionnaires des situations d'urgence d'avoir accès à des renseignements sur les dangers liés au climat, de créer sur mesure des cartes des dangers pour leur localité et de superposer des combinaisons régionales de cartes des dangers (Auld et coll., 2004).

La mise en œuvre avec succès d'un système de prévisions météorologiques avancées est une autre mesure efficace de réduction des catastrophes. Un système efficace d'alerte rapide concernant les phénomènes extrêmes permet aux gens de prendre des mesures qui sauvent des vies, réduisent les dommages, réduisent les souffrances humaines et accélèrent le rétablissement. Essentiellement, les alertes météorologiques précises et émises en temps opportun jouent un rôle crucial en accordant le temps nécessaire pour évacuer les populations, renforcer les infrastructures et préparer les interventions d'urgence. Même si les scientifiques et les gestionnaires des situations d'urgence améliorent leur capacité d'émettre des alertes pour un plus grand nombre de dangers météorologiques et de dangers environnementaux connexes, ainsi que d'émettre des alertes plus précises, il faudra apporter des améliorations additionnelles pour que les alertes soient diffusées en temps opportun et atteignent les principales populations et régions à risque. Il faudra aussi améliorer la coordination entre les responsables des alertes, sensibiliser davantage les populations à risque et établir des partenariats plus solides entre les nombreux groupes publics et privés qui prennent part aux interventions d'urgence.

Dans bien des pays, les systèmes d'alerte météorologique reposent sur une hiérarchie de messages destinés à aviser le public et les responsables des interventions d'urgence de dangers météorologiques imminents de diverses ampleurs. Généralement, ces systèmes comprennent des avis ou des veilles concernant des dangers éventuels, et des avertissements ou alertes émis lorsque les phénomènes dangereux deviennent plus certains. À mesure que les risques s'accroîtront dans certaines régions sous l'effet des changements climatiques, il faudra peut-être disposer de programmes améliorés et élargis d'alerte météorologique, tels que des alertes spécialisées à l'intention des intervenants en cas d'urgence, ainsi que de plus grands délais d'alerte. Par exemple, le Service météorologique du Royaume-Uni diffuse actuellement des préalertes concernant les phénomènes éventuellement catastrophiques jusqu'à cinq jours à l'avance auprès des responsables des interventions d'urgence, afin que ceux-ci puissent se préparer à intervenir. Puisque la prédiction des phénomènes extrêmes sur une telle échelle temporelle est difficile, particulièrement en détail, les préalertes sont exprimées en probabilités, une alerte étant émise lorsque la probabilité de perturbations causées par les

intempéries dans une région du Royaume-Uni est de 60 % ou plus (U.K. Meteorological Office, 2004). Parmi les autres programmes élargis d'alerte météorologique, on pourrait compter une hiérarchie d'avertissements de catastrophe possible, basée sur des seuils de dommages causés aux infrastructures; cela pourrait comprendre des avertissements d'accumulation extrême de glace ou de vents extrêmes risquant de perturber les transports et d'occasionner des pannes généralisées du réseau électrique (Klaassen et coll., 2003), ou des avertissements d'accumulation extrême de neige accroissant les risques d'effondrement de bâtiments (DeGaetano et Wilks, 1999). De même, les systèmes élargis d'alerte et d'intervention concernant les conditions environnementales pouvant occasionner des dangers pour la santé pourraient comprendre des avertissements de chaleur intense pour les populations vulnérables, des avertissements d'éclosion de maladie hydrique ou de qualité des eaux de baignade à l'intention des gestionnaires de l'eau (Cheng et coll., 2004; Auld et coll., 2004), ainsi que d'autres avertissements d'urgence sanitaire. Actuellement, le service météorologique de plusieurs pays, dont le Canada, fournit des systèmes de prédiction pour les avertissements de chaleur à certaines villes pilotes lorsque les risques de mortalité élevée imputables aux vagues de chaleur atteignent des seuils régionaux. Le Service météorologique du Royaume-Uni soutient également des services météorologiques liés à la santé qui ont pour but de contribuer à améliorer l'efficacité de la planification et de la prestation des soins de santé publique. Grâce à l'intégration d'informations météorologiques de grande qualité dans les processus décisionnels, les responsables de la santé publique, les fournisseurs de soins de santé, les chercheurs, ainsi que d'autres, sont en mesure de planifier avec une plus grande assurance les opérations et activités de soins de santé d'urgence, de gérer plus efficacement la charge de travail et de tirer le meilleur parti de ressources limitées affectées aux soins de santé (U.K. Meteorological Office, 2004).

Bien que les interventions d'urgence en cas de catastrophe soient importantes, les options d'adaptation des infrastructures et des collectivités à l'évolution du climat exigeront en fin de compte plus d'interventions de la part des autorités de la planification de l'utilisation des terres. L'aménagement du territoire est un outil puissant qui permet de réduire les pertes de vies humaines et de biens. Dans une étude qui illustre indirectement ce concept dans le contexte des inondations (Brown et coll., 1997), on a comparé les répercussions des tempêtes dans l'État du Michigan et dans la province voisine de l'Ontario, et l'on a conclu que les dommages non agricoles causés par les inondations consécutives à une série de tempêtes ayant traversé le Michigan dépassaient les dommages de même nature subis dans le sud-ouest de l'Ontario par un facteur d'environ 900, même si les débits de crue avaient été plus élevés en Ontario qu'au Michigan. Dans leur analyse, les auteurs en attribuaient la cause à un aménagement plus intensif des zones sujettes aux inondations au Michigan. D'une façon générale, les tempêtes étudiées dépassaient les valeurs de calcul établies aux fins de l'aménagement du territoire au Michigan, mais non en Ontario.

Les analyses diagnostiques des catastrophes prendront probablement de plus en plus d'importance dans le contexte de l'apprentissage de l'adaptation. Il faudra surveiller le comportement des ouvrages durant les phénomènes extrêmes afin de confirmer et de peaufiner les pratiques de conception tout autant que pour évaluer les valeurs de calcul climatiques. À titre d'exemple, de nombreuses leçons ont été tirées des analyses détaillées du comportement des infrastructures lors des tornades qui ont dévasté Barrie et Grand Valley dans le sud de l'Ontario, au Canada, en 1985. Les études des dommages consécutifs à la série de tornades ont indiqué que les occupants des habitations détruites avaient survécu dans les cas où les murs du bâtiment étaient adéquatement fixés aux fondations (Allen, 1986). À la suite de ces études, ainsi que d'autres, les

exigences relatives à l'ancrage des murs aux fondations dans les zones sujettes aux tornades ont été accrues dans le Code national du bâtiment du Canada de 1995 (Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies, 1995). On peut trouver des renseignements sur les risques liés aux tornades et à d'autres phénomènes météorologiques extrêmes sur le site Web d'Environnement Canada et de Gestion des urgences Ontario : www.hazards.ca.

Des leçons d'adaptation analogues ont été tirées dans le monde entier d'analyses diagnostiques des dommages consécutifs à des ouragans ayant touché terre et à des inondations. À titre d'illustration, la destruction massive causée par l'ouragan Andrew (entre 26 et 30 milliards de dollars américains) qui s'est abattu sur le sud-est des États-Unis en 1992 a fortement mis en lumière des problèmes dans les domaines de la construction, de l'atténuation et de l'industrie des assurances (International Hurricane Centre, 1999). Les recommandations du comité qui a fait enquête sur les dommages ont eu des répercussions sur le code du bâtiment et les règlements relatifs à la construction dans le sud de la Floride. Les critères modifiés concernant les essais d'approbation des nouveaux produits pour les matériaux de construction comprenaient des essais de choc et d'endurance pouvant simuler les projections de débris. Le comité a aussi établi que les plus importants dommages occasionnés par l'ouragan avaient été entraînés par la perte de l'« intégrité de l'enveloppe du bâtiment » et que l'ouverture d'une brèche dans l'extérieur d'une construction déclenchait une succession d'effets aggravant les dommages (p. ex., des volets peuvent réduire considérablement les dommages nets subis par un bâtiment lors d'un ouragan).

Les mesures d'adaptation qui réduiront les besoins énergétiques des bâtiments et qui accroîtront la résistance des systèmes d'alimentation en énergie aux catastrophes (p. ex., les sources renouvelables) pourront faire diminuer les pertes attribuables à l'interruption des affaires et les dommages aux biens, tout en contribuant à atténuer la hausse de la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre qui est à l'origine des changements climatiques. Par exemple, les bâtiments à haut rendement énergétique sont d'une précieuse utilité lorsqu'il faut recourir à des systèmes d'alimentation de secours durant une panne d'électricité. Lors de la tempête de verglas de 1998 en Amérique du Nord, le coût des aliments gâtés dans les congélateurs résidentiels en raison des pannes d'électricité a été l'un des plus importants coûts qu'ont dû assumer les sociétés d'assurance-habitation. De même, des fenêtres à haut rendement énergétique, y compris celles pourvues après coup de pellicules éconergétiques, peuvent réduire les pertes d'énergie de moitié et mieux résister aux bris occasionnés par les projections de débris durant les tempêtes de vent. Des études, par exemple, ont indiqué que les fenêtres à double vitrage dotées d'une couche à faible émissivité résistaient de trois à quatre fois plus longtemps aux bris que les fenêtres à double vitrage ordinaires (Anderberg, 1985; Mills, 2003). En outre, des enveloppes de bâtiment durables et à haut rendement énergétique (p. ex., les constructions de béton avec coffrages isolants) tendent à mieux résister aux projections de débris que les constructions à ossature de bois (Farnsworth, 2000). L'isolation des conduites d'eau et des espaces d'air froid où les conduites sont installées peut aussi entraîner des économies d'énergie et réduire les risques de gel des conduites et de dégâts d'eau, du fait que les conduites isolées se refroidissent et gèlent moins facilement. Aux États-Unis, l'industrie des assurances estime que les réclamations liées au gel de conduites ont coûté 4,2 milliards de dollars américains sur une période de dix ans (IBHS et SBA, 1999).

La détermination des mesures d'adaptation prioritaires pour les infrastructures essentielles et les régions critiques

Les nombreuses répercussions de l'évolution du climat nous obligeront à adopter une approche structurée pour renforcer et moderniser les ouvrages actuels, planifier la redondance des infrastructures essentielles ainsi que mettre à jour les valeurs de calcul climatiques et les codes et normes qui régissent les infrastructures. À la base de ces activités se trouve la nécessité d'assurer une surveillance attentive et continue des conditions climatiques régionales afin de pouvoir mettre les priorités à jour. Il faudra que le processus de détermination des priorités tienne compte du cycle de vie variable des divers types d'ouvrages ainsi que des cycles de remplacement, y compris les cycles d'entretien et de modernisation.

Au Canada, on définit les infrastructures essentielles comme étant [TRADUCTION] « les installations matérielles et informatiques, les réseaux et les biens matériels dont la perturbation ou la destruction aurait de graves conséquences pour la santé, la sécurité ou le bien-être économique des Canadiens ou pour le fonctionnement efficace des gouvernements au Canada » (Grenier, 2001). Une meilleure conception des éléments d'infrastructure les plus indispensables (comme les réseaux de communications et d'alimentation en électricité et les refuges d'urgence) et les redondances intégrées dans les systèmes peuvent accroître les probabilités de fonctionnement ininterrompu lors des phénomènes extrêmes, ainsi qu'améliorer les interventions et le rétablissement à la suite de catastrophes et réduire de façon générale les vulnérabilités à des conditions extrêmes croissantes à l'échelle régionale. On a aussi affirmé que la résistance ou l'endommagement des habitations était un facteur clé dans la détermination de la gravité d'une catastrophe naturelle et de la capacité d'une collectivité de se rétablir, ce qui indique l'importance d'une conception et d'une construction adéquates des habitations (Davenport, 1999).

La tempête de verglas qui a frappé l'est de l'Amérique du Nord en janvier 1998 représentait tout d'abord une catastrophe météorologique, mais elle est vite aussi devenue une catastrophe technologique à cause des répercussions en cascade des pannes d'électricité qui, dans certains cas, ont duré plusieurs semaines. Par suite de tout un enchaînement d'événements, les collectivités touchées ont subi les contrecoups d'une défaillance majeure de certaines de leurs infrastructures les plus indispensables comme les télécommunications, les transports, les systèmes bancaires et financiers, l'approvisionnement en eau potable et, bien entendu, l'alimentation en énergie. Cette tempête de verglas a mis en évidence le fait qu'aujourd'hui, toutes les composantes des infrastructures essentielles sont interdépendantes, particulièrement compte tenu de la nature des économies, des industries et des collectivités urbanisées qui reposent sur l'électronique et la philosophie du « juste à temps » et qui dépendent de services ininterrompus.

Même si les mesures d'adaptation devront être appliquées en priorité à certains types d'ouvrages, certaines régions pourraient aussi nécessiter que l'on prenne des mesures prioritaires pour améliorer la conception des nouveaux ouvrages et protéger les infrastructures existantes. Certaines des répercussions les plus importantes des changements climatiques sur les infrastructures toucheront probablement les zones côtières exposées, les plaines d'inondation, les zones fortement urbanisées et les régions de pergélisol. Il faudra que les options d'adaptation soient basées sur une série de mesures allant de l'évitement des zones les plus vulnérables à l'aménagement de coûteux ouvrages de protection.

De nombreuses infrastructures et collectivités dans les zones côtières et les plaines d'inondation seront exposées à d'importants risques associés à l'évolution du climat : l'élévation du niveau de la mer, l'augmentation des ondes de tempête, la hausse de la température de l'air et de l'eau, une plus forte intensité des précipitations et des tempêtes et, en conséquence, l'érosion des sols et les inondations par la mer. Il est probable que ces répercussions rendront les bâtiments et les ouvrages plus susceptibles de subir des dommages dans les zones vulnérables et conduiront à des interruptions plus fréquentes des services (Planning Institute of Australia, 2004). Tous ces effets pourraient influer à l'avenir sur la conception et le choix de l'emplacement des ouvrages. Les zones côtières exposées à de plus grands risques, mais ayant une grande valeur culturelle, environnementale ou financière, pourraient nécessiter la construction d'ouvrages coûteux de protection contre les inondations tels que des barrages et des digues et le renforcement des bâtiments et des autres ouvrages, ainsi que des mesures visant à réduire l'altération prématurée des matériaux, y compris l'amélioration des programmes d'entretien.

Les régions de pergélisol sont déjà en train de devenir vulnérables aux changements climatiques. Au cours des 100 prochaines années, selon des scénarios modérés d'émissions, on prévoit que la température annuelle moyenne dans l'Articque augmentera de 3 à 5°C à la surface des sols et jusqu'à 7°C à la surface de la mer, tandis que la température hivernale augmentera de 4 à 7°C à la surface des sols et de 7 à 10°C à la surface de la mer (ACIA, 2005). Ce réchauffement entraînera la fonte du pergélisol et nécessitera une surveillance coûteuse des bâtiments, de l'assiette des routes, des pipelines, des réseaux de services publics, des barrages et des canaux de dérivation des eaux. Le résultat net en sera probablement de vastes travaux de réparation et de modification des ouvrages actuels et la transformation des techniques appliquées aux nouveaux ouvrages. Des solutions d'adaptation éprouvées sont disponibles, si l'on prévoit les changements à l'avance, si l'on possède des informations locales fiables et si l'on dispose du financement requis; toutefois, les coûts seront élevés. Des méthodes avérées de soutènement des routes, des pistes d'aéroport et des bâtiments peuvent prévenir l'affaissement en cas de dégel du pergélisol, et un entretien coûteux peut protéger les installations construites sur le pergélisol (University of Alaska Anchorage, 2000). Il sera possible de construire les nouveaux ouvrages dans ces régions sur un pergélisol graveleux « stable au dégel » pour éviter les pires conséquences, mais il faudra prendre des mesures initiales plus coûteuses pour choisir les emplacements les plus fiables et les moins vulnérables à mesure que le pergélisol dégèlera. Toutes ces activités supposent une augmentation des coûts de construction et d'entretien des routes et des pistes d'aéroport.

Dans les régions de l'ouest de l'Arctique canadien, les conséquences de l'inaction sont en train de devenir apparentes. La surveillance de l'environnement montre que l'ouest de l'Arctique canadien se réchauffe à un rythme jamais vu au cours des 400 dernières années, la température hivernale moyenne ayant augmenté de pas moins de 3 à 4°C durant le dernier demi-siècle (ACIA, 2005). En conséquence, les routes et les pistes d'aéroport de l'ensemble de la région s'affaissent, se fissurent et se détériorent alors que le climat régional en évolution provoque la lente fonte du pergélisol sous-jacent. Dans beaucoup de localités, les revêtements d'asphalte sont fissurés, les accotements ont été emportés par le ruissellement et l'assiette des routes s'est enfoncée de pas moins d'un mètre (Airport Business, 2005). Parmi les solutions d'adaptation qui ont été appliquées avec un succès limité (Airport Business, 2005), on compte la consolidation des remblais pour empêcher des sections de route de s'effondrer (route de Dempster, au sud d'Inuvik), l'application d'isolant sous l'asphalte et l'installation de revêtements isolants à des profondeurs allant jusqu'à quatre mètres sous les pistes en train de s'enfoncer (aéroport de Yellowknife). Dans le cas de la piste de l'aéroport de Yellowknife,

la mesure d'adaptation a consisté à excaver la piste jusqu'à une profondeur totale de quatre mètres, dont un mètre dans le pergélisol, à mettre en place des panneaux isolants en mousse à haute densité de 100 mm, puis à remplir l'excavation en superposant une couche de sable, une géomembrane, puis des couches de pierre concassée et de matériau de fondation granuleux compacté. Certains tronçons de la route nordique canadienne reliant Yellowknife à Fort Providence ont été abandonnés et reconstruits sur un pergélisol plus stable. Dans d'autres cas, il a fallu modifier les pratiques d'entretien dans les aéroports (p. ex., à Inuvik) pour les adapter à de nouveaux épisodes de pluie verglaçante (précipitations qui tombaient auparavant sous forme de neige), ce qui a décuplé le volume de produits antigivrants et de gravier utilisés à l'aéroport.

On prévoit que l'évolution du climat aura des effets sur le coût et les délais de la planification, de l'amélioration et de l'entretien des infrastructures. La détermination des priorités parmi les mesures requises d'adaptation et d'atténuation devra tenir compte du cycle de vie différent des divers types d'ouvrages, ainsi que des cycles de remplacement, y compris les cycles d'entretien et de modernisation. Le tableau 1 indique les activités prévues durant le cycle de vie de divers types d'ouvrages. Comme le montre ce tableau, on prend aujourd'hui des décisions de planification concernant des bâtiments et d'autres ouvrages qui seront fort probablement touchés par les répercussions directes des changements climatiques futurs.

Lorsqu'on se penchera sur la mise en œuvre des solutions d'adaptation, il faudra prendre en considération des conditions climatiques futures différentes pour les ouvrages qui auront une vie utile de 30 à 50 ans et ceux dont la vie utile s'étendra jusqu'à 100 ans. Les biens et équipements à brève durée de vie utile tels que les systèmes de chauffage, de ventilation et de refroidissement tendent à être remplacés à diverses époques durant le cycle de vie d'un bâtiment, ce qui offre des possibilités d'adaptation, ou d'« introduction graduelle » de systèmes adaptés aux nouvelles conditions climatiques. D'autres biens à durée de vie moyenne tels que les installations industrielles, les oléoducs et gazoducs et les centrales électriques classiques, que l'on devra moderniser pour titrer parti de technologies concurrentielles, sont également susceptibles d'être remplacés ou réinstallés ailleurs à des intervalles plus courts que d'autres types d'ouvrages et peuvent devenir adaptables, particulièrement au moyen de modernisations et de réinstallations. Pour les constructions qui sont moins susceptibles d'être réinstallées ou remplacées, telles que les habitations, les défis posés par l'adaptation des composantes structurales de base seront plus difficiles à relever. Puisque l'environnement bâti se compose d'ouvrages dont l'âge et le cycle de remplacement varient, la modification des infrastructures, des institutions et des politiques en vue de composer avec les réalités des changements climatiques exigera du temps.

On s'attend à ce que les changements dans les phénomènes météorologiques extrêmes et dans les processus d'altération associés à l'évolution du climat abrègent la vie utile des ouvrages actuels dans de nombreuses régions. Là où les phénomènes extrêmes s'accroîtront, la conséquence en sera une réduction de la période « réelle » de récurrence des épisodes en fonction de laquelle les ouvrages existants ont été construits. Par exemple, Kharin et Zwiers (2005) ont analysé les changements dans les extrêmes des précipitations quotidiennes dans des conditions d'évolution du climat en utilisant les résultats d'un ensemble de simulations transitoires de modèles climatiques et ils ont conclu que la période de récurrence des phénomènes de précipitations extrêmes pouvait être réduite, en moyenne, par un facteur de deux. Cela signifie que, dans les nouvelles conditions climatiques, un épisode de précipitations se produisant tous les 20 ans pourrait survenir tous les 10 ans d'ici la fin du XXIe siècle. La modification du taux de précipitations quotidiennes extrêmes est beaucoup plus importante que celle du taux annuel moyen de précipitations. Avec

le changement des périodes réelles de récurrence des phénomènes extrêmes, à mesure que le climat évoluera, ces phénomènes auront tendance à dépasser plus fréquemment les valeurs nominales utilisées dans la conception des ouvrages et, ainsi, à réduire la durabilité et la résistance de ces derniers. Les charges répétées imputables aux phénomènes extrêmes (charges de fatigue) causent la détérioration des matériaux et peuvent conduire à la défaillance d'un ouvrage.

Compte tenu de l'échelle temporelle des répercussions de l'évolution du climat, il est évident que les nouvelles infrastructures joueront un rôle de plus en plus important dans le renforcement des capacités d'adaptation à mesure que les ouvrages anciens seront remplacés au fil du temps (comme le montrent les durées de cycle de vie du tableau 1). Par exemple, au cours des 50 prochaines années, si l'on suppose un taux de remplacement de 1 % à 1,5 % pour les bâtiments, il faudra probablement démolir et remplacer environ la moitié des bâtiments existants (Fernandez, 2002). Par conséquent, dans cet intervalle de temps, les nouveaux bâtiments en viendront à représenter la moitié ou plus du parc immobilier, et il faut que l'adaptation aux changements climatiques soit intégrée le plus tôt possible à leur conception (p. ex., en mettant constamment à jour les codes du bâtiment, en augmentant les coefficients de sécurité ou en appliquant un facteur d'adaptation aux changements climatiques, et en y incorporant des scénarios d'évolution du climat).

L'adoption de pratiques conduisant à un « cycle de vie diversifié » pour un même bâtiment pourrait aussi devenir une importante option d'adaptation (Steemers, 2003). Selon cette notion, la conception des bâtiments et des autres constructions prendra en compte le démontage ultérieur, les technologies de séparation, la récupération et le recyclage des matériaux, la facilité de modification des éléments de finition, les fondations à faible impact et d'autres technologies qui permettront de changer le mode d'utilisation des ouvrages au fil du temps (Fernandez, 2002). Le principe à la base du « cycle de vie diversifié » est que l'on conçoit un ouvrage en utilisant diverses composantes ayant une durée de vie utile différente. Ainsi, l'incertitude quant à l'utilisation à long terme d'un bâtiment ou quant aux conditions du milieu peut se refléter par des investissements réduits dans certaines composantes et l'intégration d'une possibilité d'adaptation spatiale et fonctionnelle au changement. Dans le cas de l'évolution du climat, l'objectif consisterait à prévoir les conditions climatiques futures (ou même les conditions du marché) et à envisager s'il vaut la peine de faire des investissements à long terme, en fonction des risques, des avantages et des incertitudes. En ce qui concerne les bâtiments, cela pourrait supposer que l'on investit dans une stratégie axée sur les composantes essentielles à long terme qui devront pouvoir résister aux changements climatiques prévus, et que l'on permet que les composantes à court terme soient conçues en fonction d'un minimum de changements climatiques et d'un maximum de souplesse.

L'éducation et la sensibilisation

Pour que des mesures économiques d'adaptation aux changements climatiques puissent être prises en vue de protéger les collectivités, il faudra que l'on connaisse et comprenne mieux les répercussions de l'évolution du climat dans les secteurs tant public que privé. En particulier, les planificateurs et les ingénieurs devront travailler en étroite collaboration avec les spécialistes du climat afin d'être bien au courant des répercussions des changements climatiques régionaux sur les infrastructures, et de pouvoir élaborer et appliquer des options d'adaptation à l'échelle régionale. Par conséquent, une importante étape de la promotion de la sécurité des bâtiments dans les régions vulnérables consistera à sensibiliser les collectivités et les professionnels concernés aux niveaux de risque. Puisque la planification est une profession orientée vers l'avenir, l'adaptation

à l'évolution du climat est un défi que ses membres devront accepter et entreprendre de relever dès que possible. En outre, les étudiants obtenant leur diplôme en génie et en architecture et les professionnels en exercice devront être mieux renseignés, dans le cadre de leurs programmes de formation et de perfectionnement, sur la construction d'ouvrages résistant aux catastrophes, sur les répercussions des changements climatiques et sur la nécessité de prendre des mesures d'adaptation.

Conclusions

L'évolution du climat aura des effets sur les infrastructures par suite de la modification progressive des régimes météorologiques, ainsi que de la variabilité accrue et de la plus forte intensité des phénomènes extrêmes. Puisque les ouvrages construits à notre époque sont conçus pour durer pendant plusieurs décennies, il est d'une importance capitale que l'on élabore dès aujourd'hui des options d'adaptation aux changements climatiques et qu'on les mette en œuvre le plus tôt possible. Les nombreuses répercussions de l'évolution du climat nous obligeront à adopter une approche structurée pour mettre à jour les valeurs de calcul climatiques, ainsi que les codes et les normes relatives aux infrastructures, renforcer et moderniser les ouvrages existants et planifier la redondance des infrastructures essentielles. À la base de ces activités se trouve la nécessité d'assurer une surveillance attentive et continue des conditions climatiques régionales et de déterminer quelles mesures d'adaptation doivent être prises en priorité.

À court terme, il sera possible de prendre des mesures d'adaptation « sans regret » pour réduire la vulnérabilité des infrastructures. Parmi ces mesures « sans regret », on compte celles qui viseront à réduire les incertitudes dans les valeurs de calcul climatiques et à mettre ces valeurs à jour, à mettre en application les codes et normes d'ingénierie, à assurer la qualité et la continuité des relevés et réseaux de données climatiques, à établir des calendriers d'entretien régulier pour les ouvrages existants, à effectuer des analyses diagnostiques cohérentes des défaillances des infrastructures, et à planifier la gestion des catastrophes à l'échelon des collectivités. Dans d'autres cas, les répercussions de l'évolution future du climat se situeront probablement hors du champ de l'expérience actuelle et des plages d'adaptation possibles des infrastructures, et il faudra que l'on élabore à la longue de nouvelles options d'adaptation en s'appuyant sur un « apprentissage de l'adaptation ».

En tout état de cause, l'adaptation aux changements climatiques nécessitera que les planificateurs, leurs organismes, les ingénieurs et les décideurs dans les collectivités envisagent des horizons temporels dépassant les exigences prescrites par les lois et dépassant même la durée de vie de la plupart de nos contemporains. En plus de mieux connaître les répercussions des changements climatiques et de saisir la nécessité de s'y adapter, il faudra que l'on améliore l'évaluation des risques associés à ces répercussions pour les collectivités et à la vulnérabilité de ces dernières, que l'on détermine les zones à risque, que l'on évite de les mettre en valeur et que l'on intègre constamment des stratégies d'adaptation dans la planification de l'utilisation des terres et de la gestion des catastrophes à l'échelon des collectivités. Certaines options d'adaptation des infrastructures nécessiteront des mesures rigoureuses, notamment : aménager les nouveaux ouvrages dans des zones moins vulnérables aux changements climatiques, abandonner des terres, des ouvrages et des écosystèmes se trouvant dans des zones vulnérables, aménager des ceintures vertes dans les zones résidentielles, modifier la conception des bâtiments, moderniser les ouvrages actuels et prendre des mesures de protection des zones vulnérables. De telles mesures sont réalisables, mais elles occasionneront des coûts considérables et entraîneront des perturbations dans les collectivités, et elles nécessiteront un engagement politique et une collaboration entre tous les ordres de gouvernement.

Références

Airport Business. "Studies Show Climate Change Melting Permafrost Under Runways in Western Arctic" (article by Bob Weber), June 2, 2005. http://www.airportbusiness.com/article/article.jsp?id=2258& siteSection=4

ACIA. Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, 1042 p, 2005.

Allen, D. 1986. Tornado Damage in the Barrie/Orangeville Area, Ontario, May 1985. Building Research Note BRN 240. National Research Council, Institute for Research in Construction, Ottawa, Canada, 23 pp.

Anderberg, Y. Brandfoersoek paa glaskonstruktioner [Fire Research on Glass Construction], Lund University, Institute of Fire Technology, Lund, 1985.

Association of British Insurers. 2003. The Vulnerability of UK Property to Windstorm Damage. Association of British Insurers, London, UK.

Auld H., D. MacIver, J. Klaassen, N. Comer and B. Tugwood. Planning for Atmospheric Hazards and Disaster Management under Changing Climate Conditions. In Proceedings of Engineering Institute of Canada Climate Change Technology Conference, Ottawa, May 2006. (forthcoming)

Auld H. and D. MacIver . The Changing Climate And Community Vulnerabilities to Disasters. In, Climate Change: An International Conference on Adaptation Science, Management and Policy Options (Eds. Fenech et al) . Environment Canada, Toronto, Canada, 2004.

Brown, D., S. Moin, and M. Nicholson. A comparison of flooding in Michigan and Ontario: soft data to support soft water management approaches. Canadian Water Resources Journal, 22(2), 125-139, 1997.

Buller, P. A thirty year survey of gale damage to building in the UK. In Proceedings of the 1st IAWE European and African Regional Conference, Guernsey, Building Research Establishment, Watford, UK, 1993.

Canadian Commission on Building and Fire Codes. 1995 National Building Code of Canada. National Research Council, Government of Canada, Ottawa, Canada, 1995.

Cheng S., H. Auld, G. Li, J. Klaassen, Q. Li., N. Comer, M. Campbell, N. Day, D. Pengelly and S. Gingrich. An Analysis of Possible Climate Change Impacts on Human Mortality in South Central Canada. In Proceedings of AMS 16th Biometeorology and Aerobiology Conference, Vancouver, August 25-26, 2004.

Davenport A. The House That won't Fall Down. In Proceedings of the Royal Society Conference on "Dealing with Natural Disasters", London, UK, October 27-29, 1999.

DeGaetano A and D. Wilks. Mitigating snow-induced roof collapses using climate data and weather forecasts. Meteorological Applications, 6: 301-312, 1999.

Farnsworth C. Building for Disaster Mitigation. Home Energy, 2000, January-February, 28-33, 2000.

Fernandez J. Diversified Lifetimes: Orchestrated Obsolescence for Intelligent Change Thresholds, Journal Number 24: Reproduction and Production, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Ma, USA, 2002.

Freeman P and K. Warner. Vulnerability of Infrastructure to Climate Variability: How Does This Affect Infrastructure Lending Policies? Report Commissioned by the Disaster Management Facility of The World Bank and the ProVention Consortium, Washington DC, USA, 2001.

Government of Ontario. Emergency Management Act (Bill 148). Emergency Management Ontario, Minister of Community Safety and Correctional Services, Government of Ontario, Toronto, Canada, 2003.

Grenier J. The Challenge of CIP Interdependencies. Conference on the Future of European Crisis Management. Uppsala, Sweden, 19-21 March 2001. (Available from http://www.ntia.doc.gov/ osmhome/cip/workshop/ciptf_files/fr ame.htm)

Holm F. Towards a Sustainable Built Environment Prepared for Climate Change. Presentation to Global Policy Summit on the Role of Performance-Based Building Regulations in Addressing Societal Expectations, International Policy, and Local Needs. National Academy of Sciences, Washington, DC, November 3-5, 2003. (Available from http://www7.nationalacademies.org/bice/3_05_Henning_Ho lm_pdf.pdf)

International Hurricane Centre. Weathering the Storm. In Florida International University Magazine, Spring 1999, Florida International University, Division of External Relations, Miami, Florida, USA, 1999. (Available from http://news.fiu.edu/fiumag/spring_99/ihc.html)

IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Intergovernmental Panel on Climate Change Third Assessment Report, Report of Working Group II, Geneva, Switzerland, 2001.

IBHS and SBA. Open for Business: A Disaster Planning Toolkit for the Small Business Owner. Institute for Business and Home Safety, Boston and US Small Business Administration, 1999. (Available from http://www.ibhs.org/ docs/openforbusiness.pdf)

Kharin V. and F. Zwiers. Estimating Extremes in Transient Climate Change Simulations. Journal of Climate. 18:1156-1173, 2005.

Kharin, V. and F. Zwiers. Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere–ocean GCM. Journal of Climate, 13, 3760-3788, 2000. (not cited in paper)

Klaassen J., S. Cheng, H. Auld, Q. Li, E. Ros, M. Geast, G. Li, and R. Lee. Estimation of Severe Ice Storm Risks for South-Central Canada. Report prepared for Office of Critical Infrastructure Protection and Emergency Preparedness, March 2003. Meteorological Service of Canada, Environment Canada, Toronto, Canada, 2003.

Liso K, G. Aandahl, S., Eriksen and Alfsen K. Preparing for Climate Change Impacts in Norway's Built Environment. Building Research and Information, 31 (3-4): 200-209, 2003.

Mills E. Climate change, insurance and the buildings sector: technological synergisms between adaptation and mitigation. Building Research and Information, 31 (3-4), 257-277, 2003.

Munich Re. 2000 Topics—Annual Review of Natural Disasters 1999 (supplementary data and analyses provided by Munich Reinsurance Group/Geoscience Research Group). Munich Reinsurance Group, Munich, Germany, 2000.

Munich Re 2005. Updated by Munich Re for UNFCCC COP11 events. Montreal, December 2005. http://regserver.unfccc.int/seors/file_storage/uv83ms0u3xya 5i2.pdf

Pielke, R. and M. Downton. Precipitation and damaging floods: trends in the United States, 1932-1997. Journal of Climate, 13(20), 3625-3637, 2000.

Planning Institute of Australia. 2004. Sustainable Regional and Urban Communities Adapting To Climate Change - Issues Paper. Planning Institute of Australia, Queensland Division, Australia.

Steemers K. Towards a Research Agenda for Adapting to Climate Change. Building Research & Information, 31 (3-4), 291-301, 2003.

Swiss Re. Tropical Cyclones. 201-9678, Swiss Reinsurance Company, Zurich, Switzerland, 1997.

UK Meteorological Office. Forecasting the Nation's Health. From web site (September, 2004) (Available from http://www.met-office.gov.uk/health/nationhealth.html)

University of Alaska Ankorage. The Warming World: Effects on the Alaska Infrastructure. Synthesis of Workshop Proceedings, University of Alaska, Anchorage, , 5 - 6 January 2000.

BIOGRAPHIES

Heather Auld s'est jointe à Environnement Canada en qualité de météorologue en 1979; elle a travaillé comme spécialiste des prévisions météorologiques civiles et militaires en de nombreux endroits du Canada et a donné des cours universitaires de deuxième cycle en météorologie. À titre de climatologue, elle a fait des recherches sur les valeurs de calcul climatiques et a mis au point des valeurs de ce type pour le Code national du bâtiment du Canada et diverses normes de l'Association canadienne de normalisation. En outre, Heather a été témoin expert dans le cadre de plusieurs enquêtes portant sur des catastrophes météorologiques et elle a publié dans les domaines suivants : les phénomènes météorologiques extrêmes, la prévision météorologique, la climatologie et le génie civil, la gestion des situations d'urgence, l'accumulation de glace et la biodiversité. Elle a occupé les postes de responsable des changements climatiques et de chef d'une section des sciences atmosphériques, et elle est actuellement directrice associée de la Division de la recherche sur l'adaptation et les répercussions.

Don MacIver est directeur de la Division de la recherche sur l'adaptation et les répercussions d'Environnement Canada. Il a une longue et éminente expérience de la recherche et compte à son actif plus de 100 publications scientifiques. Don possède une expérience considérable à l'échelon international; il a représenté le Canada à de nombreuses réunions du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du

climat (GIEC), de l'Institut interaméricain de recherches sur les changements à l'échelle du globe, de l'UNESCO et de la Convention des Nations Unies sur la diversité biologique. Il a été professeur à l'Université York, professeur adjoint à l'Université de Toronto et biostatisticien au ministère des Ressources naturelles de l'Ontario, avant de se joindre à Environnement Canada en qualité de météorologue et de climatologue. Outre sa carrière professionnelle, il est engagé dans la politique municipale (maire adjoint) et il est agriculteur, opérateur de radio amateur et bénévole d'urgence au sein du réseau CANWARN.

Joan Klaassen fait carrière en météorologie et en climatologie depuis 26 ans, dans le secteur privé et dans les sphères gouvernementales; son expérience s'étend à la prévision et à la consultation météorologiques ainsi qu'aux études climatologiques et sur les changements climatiques. Depuis plusieurs années, au sein d'Environnement Canada, elle est responsable des études climatiques portant sur les phénomènes météorologiques extrêmes, dont les sécheresses, les fortes précipitations, les tempêtes de neige et les graves tempêtes de verglas. Joan a également été coresponsable de la récente mise sur pied du site Web « Dangers atmosphériques » qui sera utilisé par Gestion des urgences Ontario et les municipalités de la province dans le cadre des activités liées à la Loi sur la gestion des situations d'urgence de l'Ontario.

Occasional Paper 1: *2004, Climate Change and the Adaptation Deficit, Ian Burton*

Occasional Paper 2: *2005, Mainstreaming Adaptation and Impacts Science into Solutions, Don C. MacIver*

Occasional Paper 3: *2005, Cities and Communities: The Changing Climate and Increasing Vulnerability of Infrastructure, Heather Auld and Don MacIver*

Occasional Paper 4: *2005, Climate Change: Building the Adaptive Capacity, Adam Fenech, Don MacIver, Heather Auld, Robin Bing Rong and Yongyuan Yin*

Occasional Paper 5: *2005, The Americas: Building the Adaptative Capacity to Global Environmental Change, Adam Fenech, Mary Murphy, Don MacIver, Heather Auld and Robin Bing Rong*

Occasional Paper 6: *2005, Biometeorology and Adaptation: An Overview, Don MacIver, Heather Auld, Natty Urquizo and Marianne Karsh*

Occasional Paper 7: *2006, Influences on the Sugar Maple Industry in North America, Don C. MacIver, Marianne Karsh, Neil Comer, Joan Klaassen, Heather Auld, and Adam Fenech*

Occasional Paper 8: *2007, Climate-Based Predictions Of Forest Biodiversity Using Smithsonian's Global Earth Observing Network, Marianne Karsh, Don C. MacIver, Adam Fenech and Heather Auld*

Occasional Paper 9: *2007, Changing Weather Patterns, Uncertainty and Infrastructure Risks: Emerging Adaptation Requirements, Heather Auld and Don C. MacIver*

POUR OBTENIR DES COPIES ADDITIONNELLES :

DIVISION DE RECHERCHE SUR L'ADAPTATION ET LES RÉPERCUSSIONS
Environnement Canada
4905 rue Dufferin, Toronto (Ontario)
CANADA M3H 5T4

Attention: Don MacIver
don.maciver@ec.gc.ca